

Análise numérica do comportamento de fundações superficiais tipo sapata

Frutuoso, A.

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, adrianofrutuoso@deha.ufc.br

Melo, R.M.

Boa Vista, Roraima, Brasil, rocharicardo00@gmail.com

Mota, N.M.B.

BMS Engenharia, Brasília, Distrito Federal, Brasil, neusamota@bmsengenharia.com.br

Dantas Neto, S.A.

Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, Brasil, silvrano@gmail.com

Moizinho, J.C.

Universidade Federal de Roraima, Boa Vista, Roraima, Brasil, joel.moizinho@ufrr.br

RESUMO: Neste trabalho estuda-se o comportamento de fundações superficiais em sapata de um edifício localizado em Águas Claras/DF, através da modelagem numérica tridimensional do sistema estrutural solo-fundação superficial, utilizando o programa de elementos finitos Plaxis 3D Foundation, como os seguintes objetivos: determinar os recalques e as tensões desenvolvidas no solo de fundação; avaliar a influência recíproca entre as sapatas da fundação, bem como influência das etapas de construção das fundações. Os resultados são apresentados sob a forma de tabelas e gráficos, onde os recalques obtidos pela modelagem numérica foram comparados com valores previstos através da teoria da elasticidade. As análises demonstraram a influência do efeito de grupo entre as fundações superficiais e do processo construtivo na configuração final dos recalques. Além disso, a comparação numérico-analítica mostrou que os recalques previstos pelos métodos numéricos foram maiores que os valores obtidos pelo método analítico, porém com valores menores que o limite tolerável de 65 mm (NBR 6122).

PALAVRAS-CHAVE: Fundações, Sapata, Modelagem Numérica, Recalques, Tensões

1 INTRODUÇÃO

Em projetos de edificações é da maior importância prever como as tensões e os recalques se desenvolverão na fundação com o tempo. De acordo com Aoki (2000), o desempenho de uma obra de engenharia civil ao longo de sua vida útil, especialmente da sua fundação, depende do grau de alteração do maciço de solo durante a fase de execução desta última.

A NBR-6122/96 estabelece que em obras de edificações, a medição dos recalques constitui o recurso fundamental para a observação do

comportamento da obra. A norma acrescenta que tal medida tem como objetivo permitir a comparação de valores medidos com valores calculados, visando o aperfeiçoamento dos métodos de previsão de recalques.

Na prática de engenharia de fundações as tensões e os recalques são calculados por meio de métodos analíticos, fundamentados na teoria da elasticidade, que leva em consideração a hipótese da relação constante entre tensões e deformações. O emprego dessa teoria é questionável, pois o comportamento dos solos não satisfaz aos requisitos de material elástico.

Outro ponto relevante nos projetos de edificações refere-se ao dimensionamento estrutural que é feito considerando seus apoios indeslocáveis, e o dimensionamento das fundações é desenvolvido a partir das solicitações obtidas sob a hipótese de apoios indeslocáveis e das propriedades do solo de fundação. Com isso, os recalques são previstos, supondo-se que cada elemento isolado de fundação possa se deslocar de modo independente dos demais. Em outras palavras, admite-se que os elementos estrutura e fundação possuem comportamento independente, ou seja, são desprezados os efeitos da interação solo-estrutura provocados pela deformação do solo e pela rigidez da estrutura.

Esse procedimento convencional vem sendo alvo de críticas há muito tempo, pois apesar de oferecer um ‘desempenho aceitável’ em função da hipótese de que os apoios das estruturas hiperestáticas têm facilidade de se adaptarem às deformações do solo, o mesmo conduz a resultados que se afastam da realidade, principalmente em casos de edifícios com grande número de pavimentos, como observou.

Em vista do exposto, este trabalho apresenta um estudo do comportamento de fundações superficiais, em sapata, de um edifício construído em Águas Claras/DF, através da modelagem numérica tridimensional do sistema estrutural solo-fundação superficial. Para tanto, foi utilizado o programa de elementos finitos Plaxis 3D Foundation, Versão 1.6.

2 METODOLOGIA

Para consecução dos objetivos propostos, este trabalho foi desenvolvido segundo um conjunto de atividade, conforme descrito a seguir.

Inicialmente, foi realizada uma coleta de dados do projeto estrutural do edifício e do solo de fundação, visando uma modelagem realista. A partir daí, foi feita a modelagem tridimensional de todas as fundações do prédio, levando em consideração a interação solo-fundação.

Após a modelagem numérica das fundações foi avaliado o desempenho da obra a partir da comparação dos os recalques obtidas pela

simulação com os valores obtidos por metodologias analíticas.

2.1 Descrição do edifício

O edifício em estudo (Torre E), trata-se de um edifício tipo residencial pertencente a um condomínio de prédios, constituído por um pavimento térreo, um pavimento semienterrado e 14 pavimentos-tipos, localizado na quadra 07, na cidade satélite de Águas Claras/DF. A Figura 1 apresenta uma vista 3D do edifício.



Figura 1. Vista 3D do edício.

O cálculo estrutural foi realizado de forma tradicional – as lajes transmitindo as cargas para as vigas e estas se apoiando nos pilares. Estes por sua vez, descarregando nos elementos de fundações, os quais foram dimensionados considerando a hipótese vínculos indeslocáveis. A estrutura é constituída por 50 pilares e os elementos de fundação são sapatas isoladas assentes na cota $-7,00$ m em relação ao nível do terreno.

A Tabela 1 apresenta as sapatas, suas dimensões e os carregamentos (forças verticais e momentos) provenientes da superestrutura, e a Figura 2 apresenta uma planta de locação das sapatas.

Tabela 1. Características das sapatas do edifício.

Sapata	Sapata		Pilar		Força (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)
	B (cm)	L (cm)	b (cm)	l (cm)			
S1	220	300	70	120	1750	21	0
S2	220	320	70	120	1840	18	0
S3	180	140	80	50	840	0	2
S4	170	250	50	100	960	13	0
S5	180	300	80	50	1560	0	-2
S6	155	250	50	100	1200	11	0
S7	230	160	120	50	890	0	-2
S8	160	300	80	50	1480	2	1
S9	240	420	60	150	1840	48	-1
S10	260	420	60	150	2210	52	0
S11	230	290	50	130	2420	-25	0
S12	230	290	50	130	2500	-24	1
S13	270	180	150	50	1610	0	10
S14	280	180	130	50	1710	0	-10
S15	280	190	130	50	1800	0	10
S16	270	180	130	50	1630	0	-10
S17	220	260	50	130	1730	24	0
S18	220	280	50	130	1820	22	0
S19	190	150	80	50	1110	0	2
S20/31	310	740	100	740	5980	63	0
S21/32	310	740	100	740	6310	66	0
S22	250	160	120	50	1330	0	-2
S23	240	210	95	50	1940	0	5
S24	330	185	130	50	2300	0	-12
S25	290	330	150	60	4270	-3	1
S26	290	370	150	60	4120	2	24
S27	340	185	130	50	2410	0	12
S28	250	210	95	50	2030	0	-5
S29	230	160	120	50	1270	0	2
S30	200	150	80	50	1220	0	-2
S33	230	270	50	130	1720	-25	0
S34	220	270	50	130	1720	-23	0
S35	270	180	130	50	1630	0	11
S36	280	180	130	50	1730	0	-10
S37	280	190	130	50	1780	0	9
S38	280	280	130	50	1640	0	-10
S39	220	300	50	130	2360	25	0
S40	220	300	50	130	2370	23	0
S41	180	260	80	50	1570	-2	0
S42	270	375	60	150	2460	-50	0
S43	260	375	60	150	2380	-45	0
S44	180	260	80	50	1530	-2	-1
S45	210	140	120	80	930	0	2
S46	190	130	80	50	880	0	-2
S47	165	250	50	100	950	-14	0
S48	165	250	50	100	990	-10	0
S49	210	290	50	130	1700	-22	0
S50	210	290	50	130	1690	-20	0

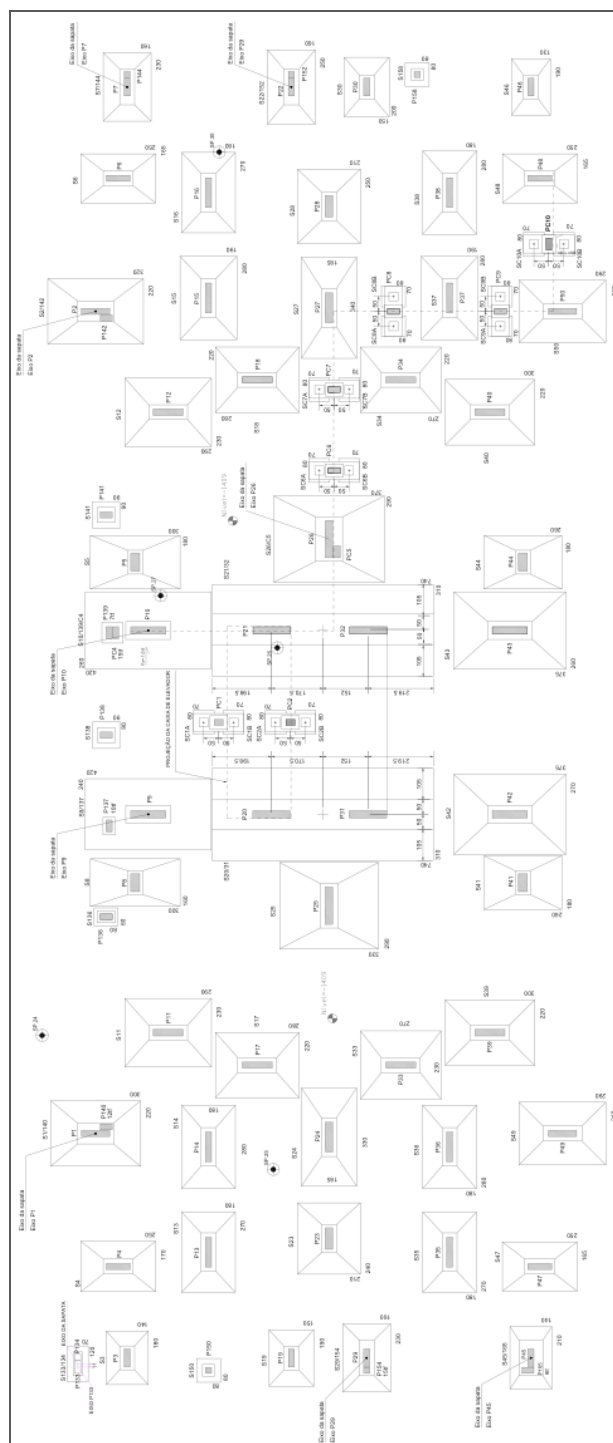


Figura 2. Planta de localização das sapatas.

2.2 Características geotécnicas local

O subsolo do edifício analisado foi caracterizado a partir de cinco sondagens a percussão realizadas no local da obra. A Figura 3 apresenta o perfil de solo idealizado de acordo com o material encontrado nas sondagens, o qual constituído por três camadas bem definida.

cota SPT	Solo
0	3
-1	12
-2	30
-3	30
-4	34
-5	35
-6	37
-7	45
-8	57
-9	59
-10	58
-11	imp
-12	

Figura 3. Perfil de solo do local da obra.

2.3 Modelagem tridimensional

A modelagem foi realizada considerando o comportamento conjunto elemento de fundação-solo, para as 50 sapatas.

O modelo constitutivo utilizado para representar o comportamento o solo de fundação foi o modelo elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb e para representar as sapatas foi o modelo elástico linear.

Para as sapatas foram adotados os parâmetros apresentados na Tabela 2 e a Tabela 3 apresenta os parâmetros do solo.

Tabela 2. Parâmetros da fundação.

Parâmetro	Valores
γ (kN/m ³)	25
ν	0,20
E (GPa)	30

Tabela 3. Parâmetros dos solos de fundação.

Parâmetro	Camada 1	Camada 2	Camada 3
γ (kN/m ³)	13,9	17,7	19
γ_{sat} (kN/m ³)	16,7	18,6	20
E (MPa)	10	20	45
ν	0,2	0,2	0,2
G (MPa)	4,2	8,3	18
c (kPa)	6	12	11
ϕ (°)	27	27	25

A modelagem foi realizada em três etapas principais: primeira etapa – modelagem do perfil de solos; segunda etapa – escavação e execução da contenção lateral das paredes da escavação; terceira etapa – execução das fundações. Nesta etapa a execução das

fundações foi simulada em 8 etapas, a fim de avaliar a interação entre as sapatas, ou seja, determinar os recalques e as tensões desenvolvidas pela construção de uma sapata sobre outra sapata próxima, bem como de um conjunto de sapatas sobre as outras, e, portanto, avaliar o desempenho das fundações. A Figura 4. mostra um detalhe da sequência de simulação das sapatas.

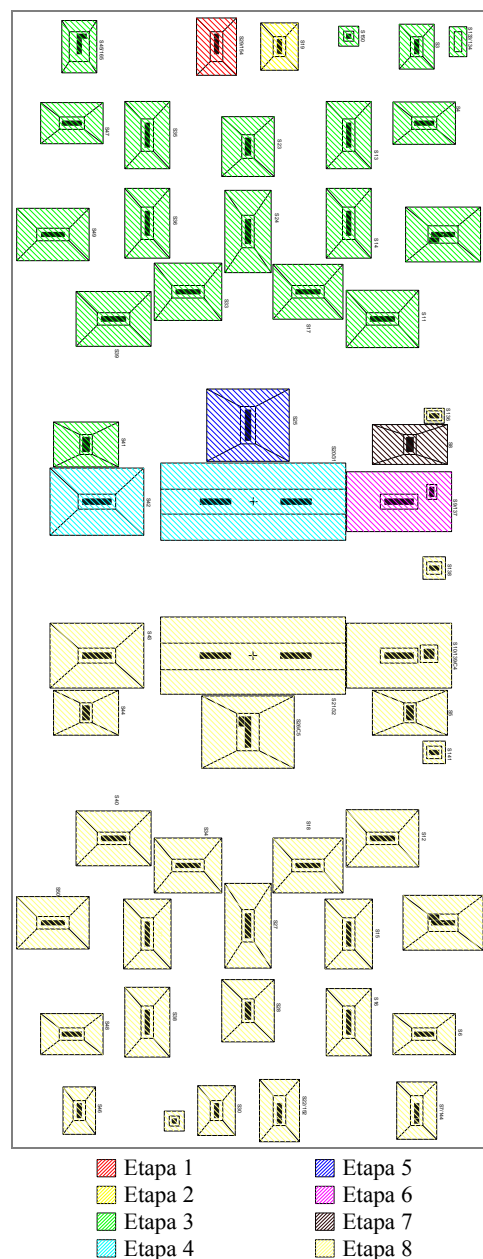


Figura 4. Detalhe da sequência de modelagem das sapatas.

A malha de elementos finitos gerada é constituída por elementos prismáticos de 15 nós para representar o solo, elementos tipo “floor”

para representar as sapatas, e elementos tipo “wall” para a contenção das paredes de escavação do solo. A Figura 5 apresenta a malha de elementos finitos geradas (discretizada com 4300 elementos e 13270 nós).

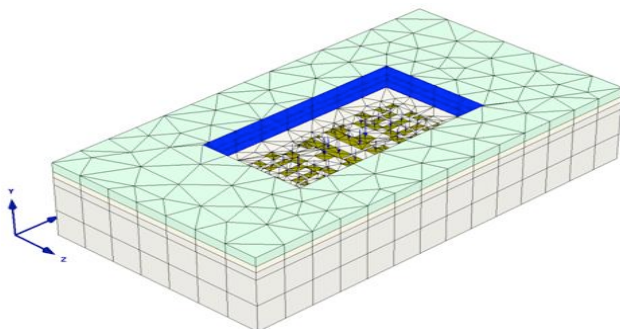


Figura 5. Modelagem do terreno escavado, com contenção e com fundação.

O carregamento em cada sapata foi aplicado como carga pontual seguindo o seguinte critério: a partir do estágio inicial (tensões iniciais), foram incluídas as sapatas e seus respectivos carregamentos, aplicados no centro e em um único estágio. A Figura 6 apresenta uma vista isométrica das sapatas com o vetor de carga.

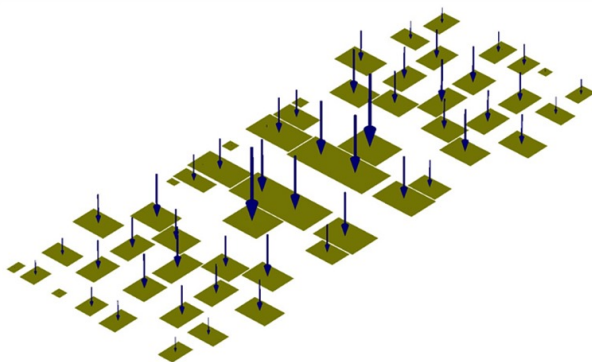


Figura 6. Vista isométrica das sapatas com seus vetores de cargas correspondentes.

Após a modelagem numérica, foram realizados o cálculo de recalque pelo método analítico com a Teoria da Elasticidade de todas as sapatas, e o acréscimo de tensões como, Método de Salas, Solução de Boussinesq e Solução de Newmark, para uma comparação entre os métodos avaliados a fim de validar os resultados de tensões e previsão de recalques obtidos através do método numérico e avaliar as limitações dos métodos analíticos.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Recalques

Os resultados obtidos estão ilustrados na Figura 7, mostram que os recalques previstos pelo método numérico foram maiores que os resultados obtidos pelo método analítico, para todas as sapatas. Esse resultado era esperado, uma vez que o método analítico utilizado foi baseado na teoria da elasticidade que considera o solo como um meio elástico linear, já no método numérico, o solo foi considerado com comportamento elástico perfeitamente plástico com critério de ruptura de Mohr-Coulomb, onde o material comporta-se como elástico linear até atingir a condição de ruptura, depois passa a ter comportamento plástico.

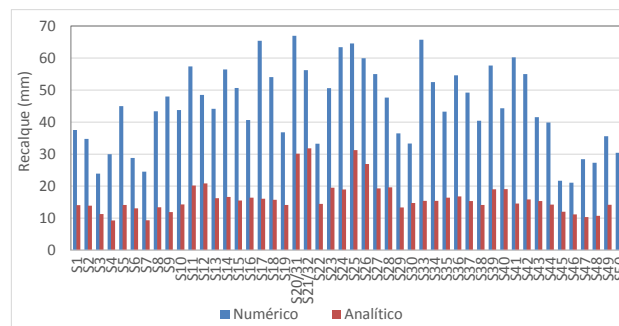


Figura 7. Recalque previsto pelo método numérico e recalque calculado pelo método analítico

Outro fato a ser considerado é que pelo método analítico os recalques são previstos para cada fundação isoladamente, isto é, sem considerar tensões geradas por fundações vizinhas, já pelo método numérico os recalques são estimados simultaneamente para todas as fundações, levando em consideração o conjunto carregamento-fundação-solo, desse modo acabam ocorrendo interação entre as fundações vizinhas.

Observa-se também, que pelo método analítico, todas as sapatas apresentaram recalques menores que o recalque total limite, de 65mm para sapata isoladas.

Assim, pode-se concluir que para carregamentos elevados, o método da elasticidade prevê recalques menores quando

comparados com os resultados de previsão de recalque obtidos pelo método numérico.

Nas Figuras 8 e 9 têm-se, respectivamente, os gráficos da relação entre as cargas e os recalques obtidos pelos métodos analítico e numérico. Na Figura 8 observa-se que o comportamento carga-recalque do solo de fundação segue uma tendência linear, isso é justificado, tendo em vista que o método analítico utilizado foi o elástico linear. Já na Figura 9 tem-se a relação entre as cargas e os recalques com comportamento não linear, e os dados podem ser ajustados exponencialmente, com uma precisão razoável.

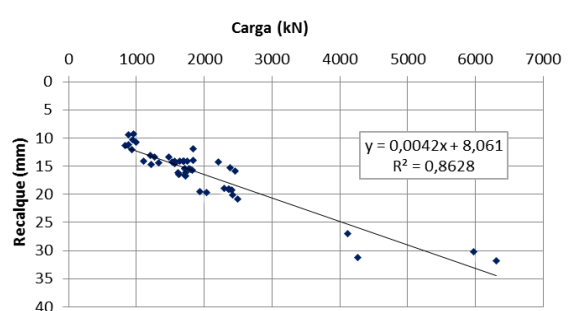


Figura 8. Carga versus recalque analítico.

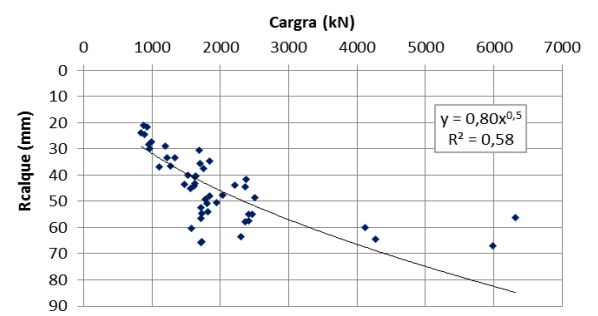


Figura 9. Carga versus recalque numérico

3.2 Análise dos recalque angulares

A fim de avaliar a movimentação diferencial entre as sapatas, foi avaliado os recalques diferenciais para um conjunto de sapatas, conforme detalhado na Figura 10.

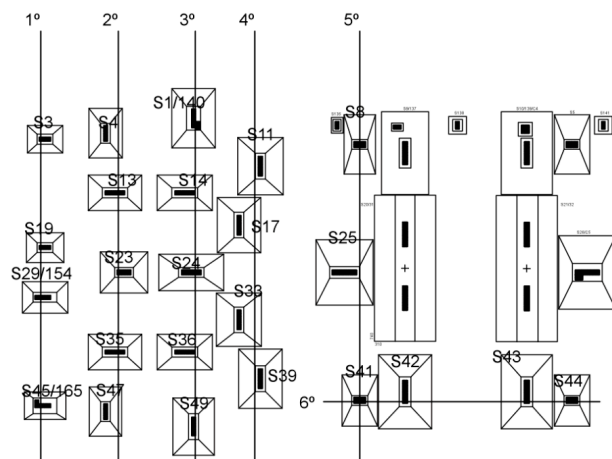


Figura 10. Indicação do conjunto de sapatas analisadas.

A Tabela 4 apresenta os recalques diferenciais para o conjunto de sapatas analisadas, pelos métodos numérico e analítico. De acordo com Moraes (1976), os recalques diferenciais obtidos, mostram-se tolerável quanto à estabilidade estrutural do edifício.

Tabela 3. Avaliação dos recalques diferenciais.

Grupo Analisado	Sapatas	Dist. (m)	$\delta v_{num.}$ (mm)	$\delta a_{analítico.}$ (mm)	Limites Toleráveis (Moraes, 1976)	
					L/400	L/250
1º	S3 S19	5500	2,35	2,84	13,75	22
	S19 S29	2500	0,11	0,77	6,25	10
	S29 S45	5500	2,69	1,3	13,75	22
2º	S4 S13	3000	4,74	6,93	7,5	12
	S13 S23	4000	1,61	3,32	10	16
	S23 S35	4000	1,84	3,12	10	16
	S35 S47	3000	4,95	6,08	7,5	12
3º	S1 S14	3800	4,97	2,51	9,5	15,2
	S14 S24	4000	1,74	2,35	10	16
	S24 S36	4000	2,2	2,15	10	16
	S36 S49	3800	5	2,63	9,5	15,2
4º	S11 S17	3000	2,68	4,09	7,5	12
	S17 S33	4800	0,06	0,69	12	19,2
	S33 S39	3000	2,69	3,62	7,5	12
5º	S8 S25	6500	3,25	17,8	16,25	26
	S25 S41	6500	0,67	16,7	16,25	26
6º	S41 S42	2300	2,27	1,26	5,75	9,2
	S42 S43	6200	2,17	0,52	15,5	24,8
	S43 S44	2300	0,73	1,12	5,75	9,2

3.3 Análise da influência entre sapatas vizinhas

Para avaliar a influência entre sapatas, foram escolhidas quatro sapatas (denominadas S19, S29, S41 e S42), por suas proximidades. A

análise foi realizada considerando dois pares de sapatas (S29-S19 e S41-S42), e calculado os recalques, da seguinte forma.

Para as sapatas S29-S19 – primeiro foi simulado a construção da sapata S29, aplicado o carregamento, e obtido os recalques em pontos ao longo do eixo entre os centros das duas sapatas; em seguida foi simulado a construção da sapata S19, aplicado o carregamento e obtido os recalques nos mesmos pontos. A Tabela 5 apresenta os valores dos recalques obtidos e a Figura 11 apresenta a deformada de recalque. Os resultados mostram recalque máximo de 14,02 mm para a sapata S29 e de 13,80mm para a sapata S19. Observa-se, também que a sapata S19 recalcou 2,87mm devido à construção e carregamento da sapata S29, esta por sua vez, recalcou 4,74 mm devido à construção e carregamento da sapata S19.

Tabela 4. Recalques causados pela influência entre as sapatas S29 e S19.

Eixo X (m)	Recalque devido a S29 (mm)	Recalque devido a S19 (mm)
0,00	9,28	14,02
0,80	9,75	15,82
1,30	6,25	14,95
1,80	3,78	15,56
2,50	2,87	13,80

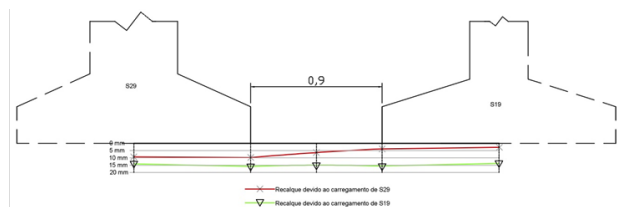


Figura 11. Recalque causado pela influência entre as sapatas S29 e S19.

Para as sapatas S41-S42 – seguiu o mesmo procedimento das sapatas anteriores: inicialmente foi simulado a construção da sapata S41, aplicado o carregamento, determinado os recalques ao longo do eixo entre os centros das sapatas; depois construiu a sapata S42, aplicou o carregamento correspondente e determinou os recalques nos mesmos pontos. A Tabela 5 apresenta os recalques obtidos e a Figura 12 apresenta a deformada de recalque. Os resultados mostram um recalque máximo de 21,32mm para a sapata S41 e de 18,80mm para

a sapata S42. Além disso, a sapata S42 recalcou 4,09 mm devido à construção e carregamento da sapata S41, esta por sua vez recalcou 12,03 mm devido à influência da sapata S41 e do carregamento.

Tabela 4. Recalques causados pela influência entre as sapatas S41 e S42.

Eixo X (m)	Recalque devido a S41 (mm)	Recalque devido a S42 (mm)
0,00	9,29	21,32
0,90	10,09	27,30
0,95	8,20	25,37
1,00	6,48	24,28
2,30	4,09	18,80

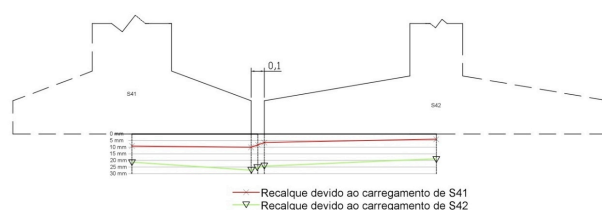


Figura 12. Recalque causado pela influência entre as sapatas S41 e S42.

Esse fenômeno acontece, pois quando se aplica uma carregamento externo no terreno desperta campo de tensões no solo, gerando assim um acréscimo na projeção da área carregada e nas laterais, e com o acréscimo de tensão gerado resulta em recalque, assim quando é aplicado uma carga na superfície do terreno o recalque não se limita apenas sob a área carregada mas também é gerado recalque nas proximidades dessa área.

3.4 Análise da influência das etapas de construção

De modo a avaliar influência das etapas de construção no comportamento das sapatas, a modelagem de execução das sapatas foi realizada em oito etapas, como descrito no Capítulo 3. Para quantificar essa influência foram selecionadas as sapatas S29 e S42. As Figuras 13 e 14 apresentam os recalques acumulados desenvolvidos nessas sapatas, por influência das etapas de construção, respectivamente.

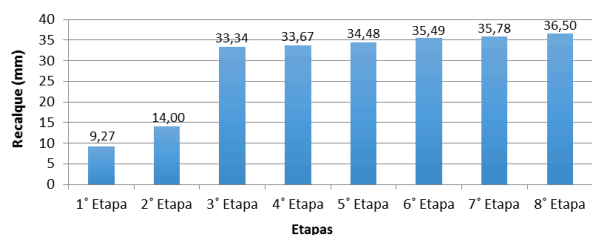


Figura 13. Recalque acumulado por etapa na sapata S29.

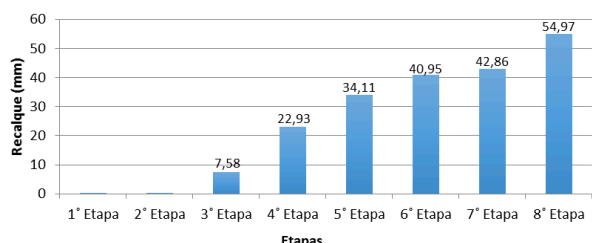


Figura 13. Recalque acumulado por etapa na sapata S42.

Os resultados mostram que a Sapata S29, localizada na extremidade esquerda da projeção da edificação, sofreu significativa influência das sapatas construídas nas 2ª e 3ª etapas, nas etapas seguintes essa influência foi pequena, isso devido ao aumento da distância entre as sapatas. A influência da 2ª etapa foi de 51% (aumento de 9,27mm → 14mm) e da 3ª etapa foi de 138% (aumento de 14 mm → 33,34mm).

Para sapata S42, localizada no centro da projeção da edificação e executada na 3ª etapa da modelagem, observa-se influência significativa das sapatas executadas nas etapas seguintes, com aumento crescente dos recalques (7,58mm → 22,93mm → 34,11mm → 40,95mm → 42,86mm → 54,97mm).

3 CONCLUSÕES

O presente trabalho procura mostrar a necessidade da utilização de metodologias mais consistentes e criteriosas no desenvolvimento de projetos de fundações, as quais possam contemplar o efeitos da interação solo-estrutura, no comportamento real das edificações. Uma previsão mais acurada desse comportamento pode trazer vantagens não só do ponto de vista econômico, como também um maior nível de segurança e confiabilidade para as edificações.

Neste sentido, as ferramentas numéricas mostram-se excelentes opções, uma vez que permitem a modelagem conjunta da

superestrutura e infreestrutura, com diferentes arranjos de carregamentos.

Conforme se pode observar no presente trabalho, a modelagem conjunta solo-elemento de fundação, permitiu obter o seguinte:

Os recalques numéricos foram superiores aos recalques analíticos, devido à consideração de cada método, com o método numérico considerando o solo um material elástico perfeitamente plástico e considerando a interação entre sapatas; já o método analítico considera o solo como um material linear elástico.

Os resultados de previsão de recalque obtidos pelo método analítico não ultrapassaram o limite de 65 mm por sapata isolada, porém alguns resultados obtidos pelo método numérico ultrapassaram o método analítico.

Os recalques angulares obtidos pela modelagem e pelo método analítico foram considerados toleráveis quanto à estabilidade estrutural do edifício.

Os resultados mostraram, também a influência do efeito de grupo entre as fundações superficiais e do processo construtivo na configuração final dos recalques.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Roraima (UFRR) e ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (UFC).

REFERÊNCIAS

- AOKI, N. (2000) *Reflexões sobre o comportamento de sistema isolado de fundação*. In: SEFEIV, São Carlos. Anais São Paulo: ABEF/ABMS.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6122: *Projeto e execução de fundações*: Rio de Janeiro, 1996.
- MORAES, M.C. (1976) *Estruturas de fundações*. São Paulo: McGraw-Hill, 1976.